研究论文

DOI:10.3969/j.issn. 1673-1689.2018.04.009

Acacia seyal 胶的疏水肽共价键合及其产物的表面物理化学性能

侯楚楚[1]，崔武卫[1,2]，吴胜芳[2]，夏咏梅[*1,2]

(1. 食品科学与技术国家重点实验室,江南大学,江苏 无锡 214122;2. 江南大学 化学与材料工程学院,江苏 无锡 214122)

摘要：阿拉伯胶 *Acacia seyal* 是亲水性较强但乳化性能欠佳的多糖乳化剂。用酪蛋白水解获得的不同水解度的疏水性肽(CHP) 通过美拉德反应接枝到 *A. Seyal* 多糖分子上,获得了一种新的多糖乳化剂，其对菜籽油/水乳状液的乳化能力最高可与 *Acacia Senegal* 胶的相近，为 *A. Seyal* 胶的约 44 倍,乳化稳定性最高提高约 20 倍;其降低表/界面张力的能力以及界面粘弹性均比 *A. Seyal* 胶增强,且随着接枝物疏水性增强而增强。通过对系列 CHP-*A. Seyal* 接枝物的亲疏水性,表面活性,溶液粘弹性及其在植物油/水乳状液中乳化活性的研究,表明多糖分子可以通过多肽的共价接枝调控其亲水亲油平衡,从而调控其表面物理化学性能尤其是乳化性能。

关键词：阿拉伯胶;酪蛋白疏水肽;美拉德反应;接枝物

中图分类号:TS 201.7　**文献标志码**:A　**文章编号**:1673—1689(2018)04—0385—07

Covalent Linkage of Casein Hydrophobic Peptide to Gum *Acacia seyal* and Surface Physicochemical Properties of the Products

HOU Chuchu[1], *CUI Wuwei*[1,2], *WU Shengfang*[2], *XIA Yongmei*[*1,2]

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Chemical and Materials Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: *Acacia Seyal* is a hydrophilic polysaccharide with poor emulsifying performance. This experiment covalently linked casein hydrophobic peptide (CHP) to gum *A. Seyal* through Maillard reaction to obtain a new polysaccharide emulsifier. The conjugates were improved in their emulsion capacity in emulsion of canola oil in water, which is up to 44-folds of that of *Acacia Seyal* and close to that of gum *Acacia Senegal*; and the emulsion stability can be increased about 20 times. Their ability to reduce the surface/interfacial tension and interfacial viscoelasticity are stronger than that of gum *Acacia Seyal*; and increased with increasing hydrophobicity of the conjugates.The hydrophilic-hydrophobic property and surface activity of CHP-*A. Seyal* conjugate, viscoelastic of

收稿日期：2016-01-23

基金项目：促进与美大地区科研合作与高层次人才培养项目(5922059999140060,2014)。

*** 通信作者**：夏咏梅(1965—),女,江苏无锡人,工学博士,教授,主要从事表面活性剂和食品添加剂的合成与应用研究。

E-mail:ymxia@jiangnan.edu.cn

引用本文：侯楚楚，崔武卫，吴胜芳，等. *Acacia seyal* 胶的疏水肽共价键合及其产物的表面物理化学性能 [J]. 食品与生物技术学报,2018,37(04):385-391.

solution,emulsion activity in canola oil/water were studied. The results indicate that the covalent attachment of peptides to polysaccharide can change the balance of hydrophilic-lipophilic of gum *A. Seyal* to modulate the surface physicochemical properties especially emulsifying properties.

Keywords: gum Arabic,casein hydrophobic peptide,maillard reaction,grafts

阿拉伯树胶来源于豆科的金合欢树的树干渗出物,在阳光下干燥后形成具有一定色泽的无规则的略透明胶块[1],以*Acacia senegal*和*Acacia seyal*等树种的产胶量最大。其中乳化性能较好的阿拉伯胶*A. senegal*(以下简称Sn)被广泛地应用于各种水包油乳状液体系中,也常被作为一种低热量的水溶性膳食纤维,用于各种保健品和饮料中[2-10]。而阿拉伯胶*A. seyal*(以下简称Sy)由于其较差的乳化性能,相对价廉,其应用也受到限制。

Sy有着与Sn类似的单糖和氨基酸组成,但是Sy有着更大的相对分子质量,更高的分枝度和较低的特征黏度,并且蛋白质含量非常低,大部分的氨基酸残基都位于树胶大分子结构的内部[11-14]。Sn和Sy中均含有AGP(阿拉伯半乳聚糖蛋白复合物),AG(阿拉伯半乳聚糖)和GP(糖蛋白)3种成分,并且Sn中的AGP含量要比Sy中高得多[14]。Flindt等[11]发现在Sy和Sn的乳液体系中,吸附于油滴表面的成分是不同的。对于Sn来说,主要是具有高分子量的蛋白质成分(AGP),能够紧密地吸附在油水界面上,疏水的多肽链吸附在油水界面上,与之相连的亲水性多糖部分则伸入水相中,从而在油/水界面形成了粘弹性的膜,降低油水间的界面张力[15];而对于Sy,高分子量的馏分难于吸附,而相对分子质量较低的蛋白质成分成为吸附在油滴上的主要成分,并且发现这部分的乳化性能远远不如AGP;与Ray等[16]得出的结论一致,指出蛋白质含量和相对分子质量较高的馏分的乳化性能最好。通过疏水多肽修饰强亲水性的Sy,有望提高Sy中的蛋白质和AGP含量,增加其在油水界面的吸附从而来改善Sy的乳化性能,也可以弥补Sn产量有限和经济成本高等缺陷,拓宽Sy的商业价值和应用空间[17-18]。

美拉德反应是基于蛋白质/多肽分子中的活性氨基和糖分子还原末端的羰基之间的羰氨反应,不需要添加催化剂,在相对温和的条件下便能顺利进行[19-20]。蛋白质和糖通过接枝形成的共聚物具有优越的乳化特性,热稳定性,溶解性,抗氧化活性和界面粘弹性。

作者采用CHP通过美拉德反应修饰Sy,通过改变Sy的亲疏水性来得到一种新型的亲水胶体乳化剂,提高其在水包油乳液体系中的乳化活性。实验考察了疏水肽修饰对接枝产物CHP-Sy的两相分配系数,界面活性和界面粘弹性的影响;同时以Sn为参照,考察其在水包油乳液体系中的乳化活性和乳化稳定性。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

阿拉伯胶(*Acacia seyal*,BR):上海唐锦实业有限公司产品。

高效液相色谱仪(Waters 600):美国Waters公司产品;紫外分光光度计(TU1901):北京普析通用仪器有限责任公司产品;实验室高剪切分散乳化均质机(OuHor):上海欧河机械设备有限公司产品;高压均质机(NS1001 L2K):意大利尼鲁索尔维产品;激光粒度分析仪(S3500):美国Microtrac公司产品;光学接触角测量仪(OCA 40):北京东方德菲仪器有限公司产品;旋转滴张力仪(SVT20N):德国德菲仪器有限公司产品;流变仪(Discovery DHR-2):美国TA仪器公司产品。

1.2 CHP的制备

室温搅拌下将NaOH溶液(2 mol/L)滴入酪蛋白和水的混合物中,直至体系pH恒定为7.0且酪蛋白溶解完全;将上述溶液置于恒温循环水浴槽,50 ℃下10 min后往其中加入胰蛋白酶(底物质量的1%),搅拌反应。水解至设定时间后(以便获得不同水解度的肽),立即将该酶解液转移至沸水浴中灭酶活10 min,冷却到室温后,用HCl溶液调溶液pH到等电点4.6,室温下离心15 min(5 000 r/min),除去未水解的酪蛋白,保留上清液酪蛋白水解肽。

用正丁醇萃取酪蛋白水解液中的疏水性肽和氨基酸[29]。将上述上清液用等体积的正丁醇萃取二次。将醇相萃取液的正丁醇旋转蒸发后真空干燥再

冻干，得到的 CHP 密封贮藏于 4 ℃备用。

酪蛋白水解肽和疏水肽的分子量分布用 GPC 检测。样品用流动相溶解（5 mg/mL），10 000 r/min 下离心 15 min 后，取上清液用 0.45 μm 微孔过滤膜过滤后进样测定。不同水解度（DH）的酪蛋白水解肽和疏水肽的相对分子质量分布见表 1。

酪蛋白水解肽和疏水肽的氨基酸组成按照国标 GB T18246–2000 进行测定。称取适量的蛋白质样品于 10 mL 的水解管中，然后加入 6 mL 的 6 mol/L 盐酸溶液进行酸水解，抽真空封管后，在 110 ℃水解 24 h，冷却后洗涤定容，过滤，蒸干，用氨基酸自动分析仪进行氨基酸组成分析。不同水解度（DH）的酪蛋白水解肽和疏水肽的氨基酸组成分别见表 2。

表 1　不同水解度的酪蛋白水解肽和 CHP 的相对分子质量分布

Table 1　Molecular weight distribution of casein hydrolysis peptide and hydrophobic peptide

水解肽和疏水肽	水解肽和疏水肽的相对分子质量分布 M_w/%			
	<2 000	2 000–5 000	5 000–10 000	>10 000
DH 1.5% 水解肽	41.14	23.50	20.17	15.19
DH 1.5% 疏水肽	63.48	21.88	10.10	4.54
DH 5% 水解肽	51.81	25.09	14.59	8.51
DH 5% 疏水肽	80.01	13.53	4.48	1.98
DH 10% 水解肽	69.09	18.13	7.05	5.74
DH 10% 疏水肽	96.84	2.61	0.45	0.10
DH 15% 水解肽	86.60	8.27	2.08	3.05
DH 15% 疏水肽	97.74	1.68	0.42	0.17

表 2　不同水解度（DH）的酪蛋白水解肽和疏水肽的氨基酸组成

Table 2　Amino acid composition of hydrolyzed and hydrophobic peptide of casein　%

氨基酸	0	DH 1.5%		DH 5%		DH 10%		DH 15%	
	Casein	水解肽	疏水肽	水解肽	疏水肽	水解肽	疏水肽	水解肽	疏水肽
天冬氨酸	5.79	6.00	5.69	6.06	5.37	5.85	3.54	5.80	3.76
谷氨酸	19.34	20.62	19.56	20.62	17.74	19.67	11.05	19.36	11.61
丝氨酸	3.59	3.56	3.43	3.64	2.88	3.49	1.57	3.35	1.80
组氨酸	2.42	2.49	2.37	2.43	2.10	2.34	1.26	2.13	1.71
谷氨酸[b]	1.64	1.48	1.82	1.50	1.96	1.48	2.07	1.48	2.25
苏氨酸	3.12	3.17	3.26	3.19	2.99	3.04	2.11	2.98	2.27
精氨酸	2.85	2.81	2.78	2.94	2.86	2.90	2.30	2.89	2.39
丙氨酸[b]	2.48	2.32	1.93	2.41	1.86	2.38	1.40	2.36	2.01
酪氨酸	4.22	2.75	3.45	3.41	4.92	3.62	7.61	3.32	9.60
半胱氨酸	0.22	0.09	0.14	0.02	0.11	0.01	0.032	0.01	0.10
缬氨酸[b]	5.78	5.58	6.61	5.73	7.04	5.57	7.91	5.47	8.86
蛋氨酸[b]	2.37	2.44	1.27	2.46	1.26	2.39	0.70	2.16	0.88
苯丙氨酸[b]	4.46	4.02	5.06	4.25	6.20	4.16	8.33	4.11	10.01
异亮氨酸[b]	4.58	4.77	4.79	4.73	4.59	4.54	4.26	4.45	5.25
亮氨酸[b]	7.71	7.10	8.88	7.59	10.80	7.45	13.20	7.21	14.51
赖氨酸	6.58	6.26	5.75	6.14	4.58	5.89	1.26	5.77	1.94
脯氨酸[b]	6.84	4.12	6.42	4.25	6.72	3.98	7.88	4.09	8.62
色氨酸[b]	2.62	2.27	2.18	2.08	2.38	2.08	1.76	1.93	0.75
疏水性氨基酸	38.49	34.10	38.97	35.01	42.80	34.02	47.51	33.26	53.15
总氨基酸	86.61	81.85	85.39	83.60	86.36	80.93	78.24	78.98	88.32

[b] Hydrophobic amino acid.

1.3　CHP–Sy 接枝物的制备

将 1.2 中获得的 CHP 与 Sy 按 1:3 比例溶于去离子水中，室温下搅拌 2 h 分散均匀后冻干，然后将冻干产物磨成粉末后过 80 目筛。取适量上述粉末于培养皿中，将其放入到底部盛有饱和 NaCl 溶液的干燥器中，在 60 ℃的烘箱中进行美拉德反应，3 天后停止反应，得到不同接枝度的接枝产物，将得到的产物冻干后密封贮藏于 4 ℃备用，接枝度的测

定采用 TNBS 法。

1.4 分配系数

将 CHP-Sy 接枝物溶解在适量的去离子水中后,滴加 HCl 溶液,调节 pH 至 4.6,使未参与反应的 CHP 发生沉淀,离心(10 000 r/min,30 min)取上清液,调 pH 至 7.0,透析(3.5×10^3)后进行冷冻干燥;将冻干物(0.1 g)溶于 100 mL 去离子水,加入等体积的无水乙醇后持续搅拌 2 h,将沉淀完全后抽滤得到的滤渣复溶在去离子水中,冷冻干燥得到纯度较高的接枝产物。测定 Sy 和不同水解度的 CHP-Sy 接枝物在两相分配平衡后的氮浓度,以两相氮浓度的比值($C_{醇相}/C_{水相}$)来表示接枝物的分配系数 K。

1.5 接枝物红外光谱分析

溴化钾压片法测 Sy 和 CHP (DH 1.5%)-Sy 接枝物在除去未反应部分疏水肽前后的红外光谱。

1.6 粘弹性

将适量的 Sy 分散于适量的磷酸盐缓冲液中(pH 7.0,0.2 mol/L),充分搅拌 1 h 并在 4 ℃下过夜以充分水化样品,离心后保留上清液,此储备液用于凝胶流变性质的测定,使用前在室温下搅拌 1 h 后上样。小振幅动态振荡测量于 DHR-2 流变仪中进行。平行板直径为 40 mm,其间隙设置为 0.8 mm。将 1mL 样品置于平板与探头之间,除去过量的样品。在平板边缘添加一层薄硅油,防止水分的蒸发。设置相关参数,温度维持在 25 ℃,找寻线性粘弹区;在 5%的应力下,对样品(0.5%)进行频率扫描(0.1~10 rad/s),记录弹性模量 G'及粘性模量 G''随频率变化规律。

1.7 表面张力和界面张力

表面张力的测定用悬滴法,将样品分别配制成一定浓度梯度的溶液,在测定前于 25 ℃水浴中恒温 30 min,并用超纯水对仪器进行校正。

界面张力用旋转低界面张力仪进行测定,样品质量浓度 0.36 g/dL,振动频率 4 500 r/min,测定界面张力随时间的变化(25 ℃)。

1.8 乳化能力和乳化稳定性

将适量样品溶于 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液(pH 7.0)中,室温下持续搅拌 30 min 后,往其中加入一定量的菜籽油,用实验室快速组织捣碎机在 10 000 r/min 下均质 60 s 后,离心 5 min(1 500 r/min),测定乳化层高度和乳液总高度。

将离心后的乳液,在 80 ℃的水浴中恒温 30 min 后,冷却,再次离心,记录此时乳化层高度和乳液总高度。

1.9 接枝物在水包油乳液体系中的粒径分布

将接枝物分散在醋酸缓冲溶液中(pH 4.0,0.1 mol/L),控制浓度为 2.0%,并加入质量分数 0.01%的叠氮化钠为抗菌剂,在 4 ℃下放置 12 h,使其充分水化,离心 30 min(5 000 r/min),然后慢慢地往该分散体中加入适量菜籽油,用快速捣碎机预均质 2 min,然后在 35 MPa 下高压均质 3 次,得到待测乳液。乳液的粒径分布用激光粒度分析仪测定,设定连续相折射指数 1.333,分散相折射指数 1.466。

2 结果与讨论

2.1 CHP-Sy 接枝物的亲水亲油性

用正丁醇提取的 CHP 比之萃取前水解液中获得的水解肽的相对分子质量相对较低且分布较广(表 1),疏水性氨基酸含量更多因而疏水性更强(表 2)。非离子表面活性剂的亲水亲油性可用 HLB 值表征,但正丁醇/水两相分配系数的适用对象相对而言可比性更宽泛。图 1 表明接枝物的疏水性比 Sy 的高,但接枝物疏水性随着接枝肽链 CHP 水解度的增大而减小,即实验范围内低水解度的接枝物具有更高的疏水性。这是因为随着 CHP 水解程度的增大,能够参与美拉德反应的活性氨基(赖氨酸)的比例在不断减少(表 2),造成 CHP 与 Sy 的接枝度减小。

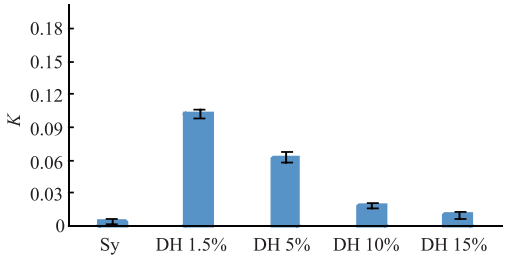


图 1 Sy 和 Sy 接枝物的正丁醇/水分配系数

Fig. 1 Partition coefficient of Sy and grafts of Sy

2.2 接枝物红外光谱图

图 2 是 Sy,CHP (DH 1.5%)-Sy 接枝物在除去未反应部分疏水肽前后的红外光谱图。由于 Sy 中的蛋白质含量非常低,Sy 在酰胺Ⅰ带(1 700~1 600 cm^{-1})和酰胺Ⅱ带(1 480~1 575 cm^{-1})几乎没有吸收,而除去未反应部分的疏水肽后,酰胺Ⅰ带和酰胺Ⅱ带仍有较明显的吸收峰,说明有部分疏水肽确实与 Sy 发生了接枝反应。

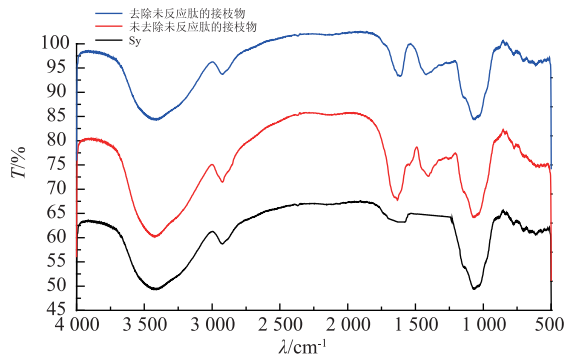


图 2　Sy 和 CHP(DH 1.5%)–Sy 接枝物在除去未反应部分疏水肽前后的红外光谱图

Fig. 2　FT–IR spectrum of CHP(DH 1.5%)–Sy conjugates

2.3　CHP–Sy 接枝物溶液的表/界面张力和界面粘弹性

从图 3 中可以看到，与 Sy 相比，接枝物大大降低了表面张力和液液界面张力，并且接枝物降低表面张力和界面张力的能力随着接枝物疏水性增高而增强。

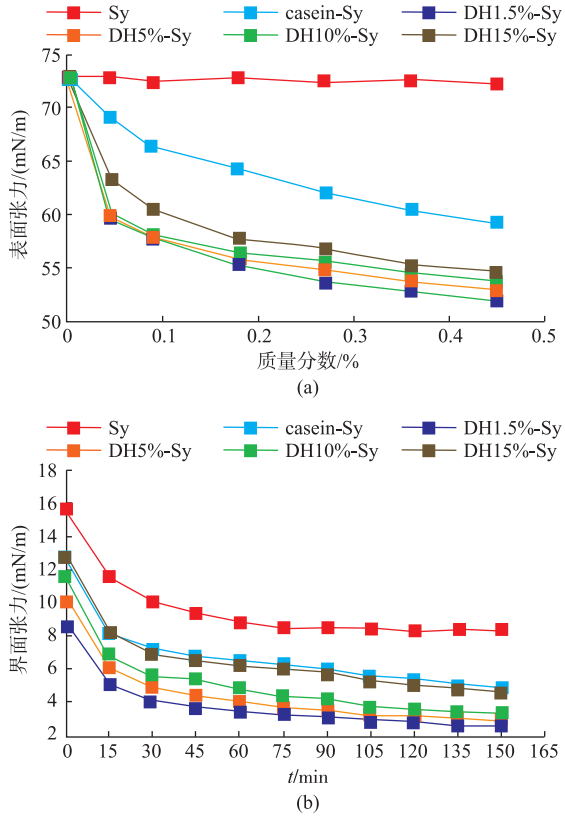


图 3　Sy 和 CHP–Sy 接枝物的表面张力和界面张力随浓度的变化(25 ℃)

Fig. 3　Surface/Interface tension of Sy, casein and CHP–Sy conjugates as a function of concentration at 25 ℃

Sy 及其接枝物质量分数范围在 0.5%~4%之间时，其黏度不随剪切速率的增大而发生变化，存在着明显的线性粘弹区，呈现出牛顿流体行为(图 4)。而 Sy 的粘性模量 G''在所选频率区始终大于弹性模量 G'(图 5)，说明 0.5%的 Sy 溶液在气液界面呈现出更明显的粘性特征，并且两种模量的变化在高频区对频率的依赖性比较大。而 CHP(DH1.5%)–Sy 接枝物的界面粘弹性特征升高，是因为 DH 1.5%的 CHP 的溶解性要远远好于酪蛋白，其接枝物不仅水溶性好，而且有着较高的分配系数，有效结合了多肽的疏水性和多糖的亲水性，增强了其界面活性，更多乳化剂分子紧密的吸附在界面层，从而导致界面粘弹性要好于单独的 Sy。

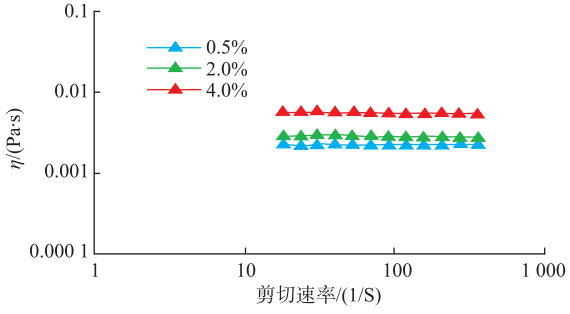


图 4　Sy 的粘度随剪切速率的变化

Fig. 4　Steady shear rate dependence of viscosity for Sy

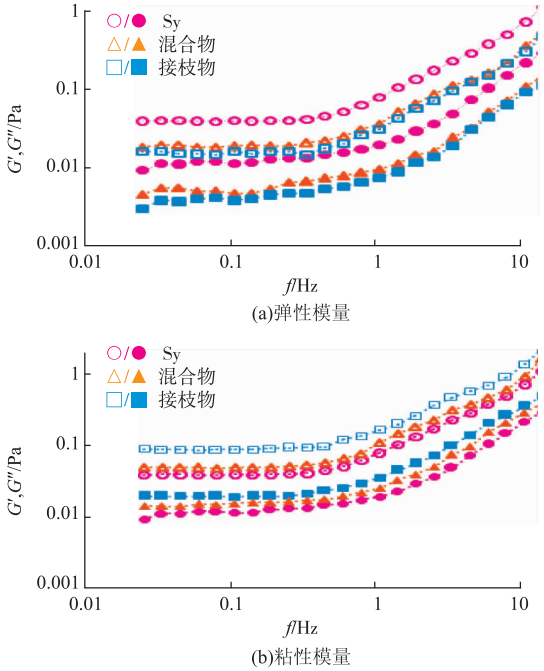


图 5　弹性模量(a)和粘性模量(b)变化

Fig. 5　Mechanical spectra at of Sy, Casein–Sy (a) and DH 1.5%–Sy(b)

2.4 CHP–Sy 接枝物在油/水乳状液中的乳化行为

2.4.1 *乳化能力和乳化稳定性* 如图 6 所示,Sy 经不同水解度的疏水肽链接枝后,乳化能力和乳化稳定性有了明显的增大,并且随着 CHP 水解度的降低,接枝物对乳液的乳化能力和乳化稳定性均随之增大,水解度为 1.5%的 CHP 与 Sy 的接枝物的乳化能力与 Sn 非常接近,乳化能力从 1%提高到 44%。接枝物的乳化稳定性仍不及 Sn,说明接枝物的结构改造仍有上升空间。

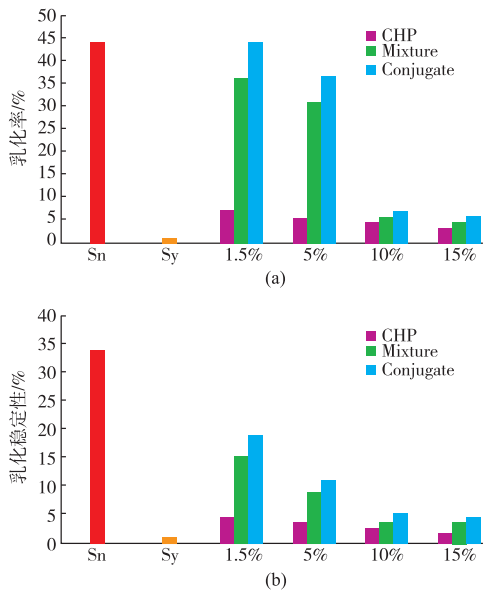


图 6 Sn,Sy,CHP,CHP–Sy 的混合物和接枝物的乳化能力和乳化稳定性(pH=7.0,25 ℃)

Fig. 6 Emulsion capacity and stability of Sn,Sy,CHP, CHP–Sy mixtures and conjugates(pH=7.0,25 ℃)

2.4.2 *乳液粒径分布* 用 CHP–*Acacia Seyal* 接枝物作为菜籽油/水乳状液的乳化剂,在水包油乳液体系(菜籽油/水)中,接枝物的乳化性能超过 Sy 的但略逊于 Sn 的。并且疏水性强的接枝物能形成更小的乳液粒径即具有更好的乳化活性,尤其是 DH 为 1.5%的 CHP 与 Sy 的接枝产物,Sy 经 CHP(DH 1.5%)接枝后,乳液的平均粒径从 5.66 μm 减小到 1.10 μm;但是 DH 1.5%–Sy 的接枝物所形成乳液的体积粒径分布并没有呈正态分布,进一步证实了接枝物的乳化稳定性不如 Sn 的,结果见图 7。

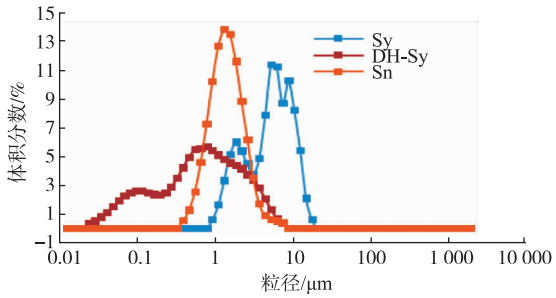


图 7 Sy,Sn,和 DH–Sy 接枝物制备得到的新鲜水包油乳状液的体积粒径分布(pH= 4.0,25 ℃)

Fig. 7 Comparison of particle size distribution for fresh emulsions made from canola oil/water stabilized by Sy,Sn and DH–Sy conjugates at pH 4.0,25 ℃

3 结 语

用酪蛋白水解获得的疏水性肽通过美拉德反应与强亲水性的 *Acacia Seyal* 胶接枝,与获得的接枝物与 *Acacia Seyal* 胶相比,其疏水性增强。实验范围内,接枝物降低表/界面张力的能力以及界面粘弹性均比 *Acacia Seyal* 胶增强,且随着接枝物疏水性增强而增强。接枝物对菜籽油/水乳状液的乳化能力(44.08%)最高可达到与 *Acacia Senegal* 胶相近的值(43.93%),为 *Acacia Seyal* 胶的约 44 倍;其乳化稳定性最高则为 *Acacia Seyal* 胶的约 20 倍,但只及 *Acacia Senegal* 胶的 56%。

参考文献:

[1] VANLOOT P,DUPUY N,GUILIANO M,et al. Characterisation and authentication of *A. senegal* and *A. seyal* exudates by infrared spectroscopy and chemometrics[J]. **Food Chemistry**,2012,135(4):2554-2560.

[2] AKHTAR M,DICKINSON E. Whey protein-maltodextrin conjugates as emulsifying agents:An alternative to gum arabic[J]. **Food Hydrocolloids**,2007,21(4):607-616.

[3] YE A Q,GILLILAND J,SINGH H. Thermal treatment to form a complex surface layer of sodium caseinate and gum arabic on oil-water interfaces[J]. **Food Hydrocolloids**,2011,25(7):1677-1686.

[4] YE A Q,EDWARDS P J B,GILLILAND J,et al. Temperature-dependent complexation between sodium caseinate and gum

arabic[J]. **Food Hydrocolloids**，2012，26(1)：82-88.
[5] MU L，ZHAO H，ZHAO M，et al. Physicochemical properties of soy protein isolates-Acacia gum conjugates [J]. **Czech Journal of Food Sciences**，2011，29(2)：129-136.
[6] SARKAR S，SINGHAL R S. Esterification of guar gum hydrolysate and gum arabic with n-octenyl succinic anhydride and oleic acid and its evaluation as wall material in microencapsulation[J]. **Carbohydrate Polymers**，2011，86(4)：1723-1731.
[7] WEINBRECK F，TROMP R，DE K C. Composition and structure of whey protein/gum arabic coacervates [J]. **Biomacromolecules**，2004，5(4)：1437-1445.
[8] MEKHLOUFI G，SANCHEZ C，Renard D，et al. pH-induced structural transitions during complexation and coacervation of β-lactoglobulin and acacia gum[J]. **Langmuir**，2005，21(1)：386-394.
[9] WEINBRECK F，ROLLEMA H S，TROMP R H，et al. Diffusivity of whey protein and gum arabic in their coacervates [J]. **Langmuir**，2004，20(15)：6389-6395.
[10] WEINBRECK F，DE VRIES R，SCHROOYEN P，et al. Complex coacervation of whey proteins and gum arabic [J]. **Biomacromolecules**，2003，4(2)：293-303.
[11] FLINDT C，AL-ASSAF S，PHILLIPS G O，et al. Studies on Acacia exudate gums. Part V. Structural features of Acacia seyal[J]. **Food Hydrocolloids**，2005，19(4)：687-701.
[12] HASSAN E A，AL-ASSAF S，PHILLIPS G O，et al. Studies on Acacia gums：Part III molecular weight characteristics of Acacia seyal var. seyal and Acacia seyal var fistula[J]. **Food Hydrocolloids**，2005，19(4)：669-677.
[13] AL-ASSAF S，PHILLIPS G O，WILLIAMS P A. Studies on Acacia exudate gums：part II. Molecular weight comparison of the Vulgares and Gummiferae series of Acacia gums[J]. **Food Hydrocolloids**，2005，19(4)：661-667.
[14] SIDDIG N E，OSMAN M E，AL-ASSAF S，et al. Studies on acacia exudate gums，part IV. Distribution of molecular components in Acacia seyal in relation to Acacia senegal[J]. **Food Hydrocolloids**，2005，19(4)：679-686.
[15] BUFFO R，REINECCIUS G，OEHLERT G. Factors affecting the emulsifying and rheological properties of gum acacia in beverage emulsions[J]. **Food Hydrocolloids**，2001，15(1)：53-66.
[16] RAY A K，BIRD P B，IACOBUCCI G A，et al. Functionality of gum arabic. Fractionation，characterization and evaluation of gum fractions in citrus oil emulsions and model beverages[J]. **Food Hydrocolloids**，1995，9(2)：123-131.
[17] RANDALL R C，PHILLIPS G O，WILLIAMS P A. The role of the proteinaceous component on the emulsifying properties of gum arabic[J]. **Food Hydrocolloids**，1988，2(2)：131-140.
[18] CHIKAMAI B，BANKS W，ANDERSON D，et al. Processing of gum arabic and some new opportunities [J]. **Food Hydrocolloids**，1996，10(3)：309-316.
[19] KATO A，SASAKI Y，FURUTA R，et al. Functional protein-polysaccharide conjugate prepared by controlled dry-heating of ovalbumin-dextran mixtures[J]. **Agricultural and Biological Chemistry**，1990，54(1)：107-112.
[20] NI Kongwei，ZHANG Meng，XU Dalun，et al. Antioxidant activity of maillard reaction products derived from enzymolysis product of portunus pelagicus meat with reducing sugars [J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**，2015，34(3)：239-245.(in Chinese)